

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ ДЕФЕКТІВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ****О. В. Попович**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: olya.popovych@gmail.com

Запропоновано новий підхід до вирішення проблеми визначення оцінки характеру дефектів і передбачення можливості їх розвитку в процесі експлуатації. В роботі проаналізовано можливості реалізації когерентних методів обробки інформації для діагностування важливого обладнання. Запропоновано методику контролю з допомогою технології ультразвукових фазованих решіток. Розглянуто теоретичні основи функціонування ультразвукових фазованих решіток, наведено методику вибору перетворювачів для контролю різних об'єктів. На основі викладеної теорії представлено метод контролю якості зварних з'єднань з метою виявлення та визначення типу дефекту (плаский чи об'ємний). Представлено результати експериментальних досліджень елементів зварного з'єднання газопроводу та визначено напрям подальшої роботи, щодо розвитку нового методу контролю.

Ключові слова: металокопструкції, технічна діагностика, неруйнівний контроль, ультразвукові фазовані решітки, дефекти, порушення цілісності.

Предложен новый подход к решению проблемы определения оценки характера дефектов и предвидение возможности их развития в процессе эксплуатации. В работе проанализированы возможности реализации когерентных методов обработки информации для диагностики важного оборудования. Предложена методика контроля с использованием технологии ультразвуковых фазированных решеток. Рассмотрены теоретические основы функционирования ультразвуковых фазированных решеток, приведена методика выбора преобразователей для контроля различных объектов. На основе изложенной теории представлен метод контроля качества сварных соединений с целью выявления и определения типа дефекта (плоский или объемный). Представлены результаты экспериментальных исследований элементов сварного соединения газопровода и определено направление дальнейшей работы, по развитию нового метода контроля.

Ключевые слова: металлокопструкции, техническая диагностика, неразрушающий контроль, ультразвуковые фазированные решетки, дефекты, нарушение целостности.

A new approach to solving the problem of determining the nature of the defect evaluation and prediction of the possibility of their development during the operation was proposed. This paper analyzes the feasibility of coherent information processing methods for the diagnosis of critical equipment. The method of control using ultrasonic phased array technology has been developed. The theoretical basis for the functioning of ultrasonic phased array shows the method of transducers selection for monitoring of different objects. Based on the above theory the quality control method of welded joints to detect and determine the defect type (flat or volume) was represented. The results of experimental studies of the elements of the welded joint of the pipeline were presented and the direction of further work on the development of a new method of control was determined.

Keywords: metal construction, technical diagnostics, non-destructive testing, ultrasonic phased array, defects, lack of adhesion.

Вступ. Основною умовою експлуатації обладнання нафтогазової промисловості є надійність складних технічних об'єктів, яка визначається наступними факторами:

- відсутністю значних помилок в проектуванні і розрахунку конструкцій, виборі матеріалів і технологій виготовлення або

спорудження об'єкта;

- якістю матеріалів, монтажньо-зварювальних робіт;

- умовами експлуатації.

Враховуючи те, що одним із найбільш складних процесів життєвого циклу металокопструкцій є спорудження та

експлуатація, контроль якості на кожному з цих етапів є першочерговим та повинен задовольняти багатьом умовам. Тривалий час основна вимога до якості матеріалів, виробів і місць їх з'єднання полягала в недопущенні дефектів порушення цілісності. В даний момент термін передбачуваного фізичного зносу більшої частини обладнання становить близько 75%. Цей показник, відповідно, швидко зростає в усіх галузях промисловості. Такі об'єкти являють собою серйозну небезпеку, однак економічні причини змушують продовжувати їх експлуатацію. Тому методи визначення фактичного стану, залишкового ресурсу елементів і конструкцій об'єктів нафтогазової промисловості набувають першочергового значення. Для розрахунків міцності і оцінки ресурсу складних технічних об'єктів необхідно мати інформацію про ступінь небезпеки виявлених дефектів, розподіл внутрішніх напружень і їх кількісні характеристики, а також фактичні механічні характеристики матеріалу. Тому основним призначенням контролю є отримання інформації в обсязі, необхідному і достатньому для виконання розрахунків залишкового ресурсу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Відповідно до існуючої практики та досвіду контролю важливих металоконструкцій на наявність дефектів, найбільш поширеним методом виявлення внутрішніх дефектів є ультразвуковий контроль. Основними параметрами, що описують виявлений дефект при ультразвуковому контролі протягом останніх 50 років залишалися умовні розміри та еквівалентна площа. Всі ці параметри не завжди адекватно описують реальні параметри дефекту [1]. Результати ультразвукового контролю (А-скан) є складними для розшифрування та вимагають значного практичного досвіду оператора для подальшого висновку щодо допустимості дефекту та часткового визначення можливості розвитку та росту дефектів внаслідок напружень, що виникають в процесі експлуатації обладнання.

Аналіз випадків руйнування зварних конструкцій, що працюють в різних умовах, свідчить про те, що найчастіше їх руйнування починається від дефектів, що виникають в зварному з'єднанні чи в основному металі [2]. Основними причинами виходу із експлуатації зварних конструкцій, що працюють в різних умовах, є дефекти зварного шва чи основного металу [3].

Придатність зварних з'єднань і конструкцій в цілому визначається якістю зварного шва: характером їх макро- та мікроструктури, однорідністю хімічного складу, наявністю дефектів. Експлуатація конструкцій понад

нормативний ресурс, під впливом значних навантажень, агресивних середовищ створює передумови для виникнення експлуатаційних дефектів, а також розвитку дефектів, що виникли внаслідок порушення технологій зварювання.

Вплив дефектів залежить від розподілу остаточної і робочих напружень, що виникають в процесі експлуатації. Тріщини, що являються концентраторами напружень, а отже під їх напружень можуть збільшуватись, послаблюють січення шва чи зварних елементів, що зменшує статичну міцність конструкції.

Результати досліджень впливу об'ємних дефектів [3] підтверджують, що наявність пор певної величини і їх одиночне розташування в металі шва практично не знижує його статичної міцності. Можна вважати, що виявлення плоских дефектів є першочерговим фактором міцності зварного з'єднання.

Тому ідентифікація виду виявленого дефекту дасть можливість зробити висновок про подальшу експлуатацію металоконструкції.

Порушення цілісності металу створює різноманітні сигнали в приладах неруйнівного контролю – образи. На даний час проблема розпізнавання дефектів повністю покладена на оператора, що проводить контроль. Наша задача полягає в пошуку підходу, що дозволить збільшити доступну для аналізу інформацію і спростити процес прийняття рішень оператором. Метою даної роботи є розробка методики контролю для виявлення та визначення виду і розмірів виявлених дефектів (типу порушення суцільності) важливих металоконструкцій, що дасть змогу більш точно визначити фактичний технічний стан та розрахувати умови та термін безпечної експлуатації обладнання.

Вирішення проблеми. Завдання виявлення в УЗ дефектоскопії в значній мірі вирішена, тоді як завдання класифікації продовжує залишатися однією з найважчих задач, яка в повному обсязі не вирішена до теперішнього часу. Перш за все, це пов'язано з тим, що перед дефектоскопією стоїть завдання, що відноситься до класу обернених задач - зворотна задача розсіювання: визначення характеристик дефекту (швидкість звуку, щільність, загасання, форма неоднорідності, тип) за результатами вимірювань.

Завдяки стрімкому розвитку сучасних технічних засобів контролю, особливі перспективи використання отримали когерентні методи візуалізації дефектів із застосуванням комп'ютерів, в яких фізичними параметрами акустичних полів є амплітудна, фазова, часова і просторова характеристики поля.

Прилади, що використовують когерентні методи візуалізації дефектів мають важливу

перевагу перед традиційними дефектоскопами: вони використовують значно більше інформації про дефект, що дозволяє візуалізувати внутрішню структуру об'єкту контролю - отримати акустичне зображення з дуже високою роздільною здатністю - порядку довжини використовуваної звукової хвилі, високим відношенням сигнал - шум, добре відтворювані при повторному контролі.

Визначити тип і форму дефекту простіше по дво- та тривимірному акустичному зображенню внутрішньої структури об'єкту контролю (ОК) [4]. Пропонується використання ультразвукових дефектоскопів з фазованими решітками (ФР), які уже досить давно знайшли широке застосування в медичній діагностиці і на даний час є одними з найперспективніших методів для впровадження в технічній діагностиці промислового обладнання різного призначення. Основними перевагами технології ФР є значне підвищення інформативності контролю (порівняно з механічним сканування), можливість швидкої зміни форми діаграми направленості для фокусування ультразвукової енергії.

При використанні технології ФР генерується ультразвуковий промінь з настроюваними параметрами: кутом вводу, фокусною віддаллю і розміром фокусної плями. Відмінність ФР від традиційного ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) в тому, що використовується не один п'єзоелемент, а певна кількість конструктивно-об'єднаних ПЕП, (рис. 1) [5], керування якими здійснюється за рахунок подачі на п'єзоелементи ФР напруги з певною часовою затримкою (рис. 2).

Базовими параметрами перетворювачів з ФР є частота, ширина елемента, відстань між елементами (d), кількість елементів (N) (рис.3). Для досягнення вищої чутливості в процесі НК при використанні ПФР необхідно вибрати таке значення спрямованості $H(\theta)$, щоб звуковий тиск p , що визначається за формулою (1) в точці фокусування був максимальний, а в інших напрямках поширення – мінімальним. Зауважимо, що розв'язок рівняння (2) повинно задовольняти умові $0 < H(\theta) < 1$, і значення функції на куті фокусування відповідає умові $H(\theta_s) = 1$.

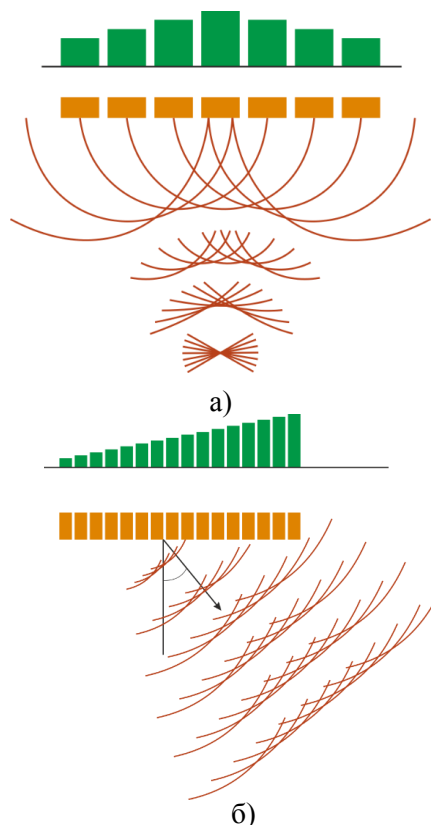


Рисунок 1 – Зміна напрямку поширення ультразвукового поля УЗФР а) під прямим кутом, б) на заданий кут

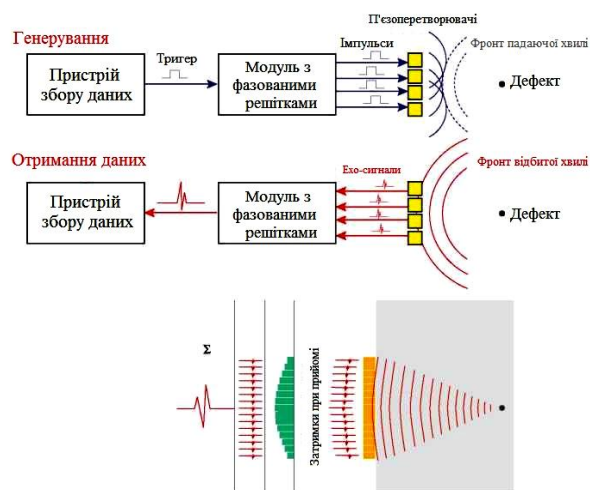


Рисунок 2 – Процес формування ультразвукового променя за допомогою УЗФР

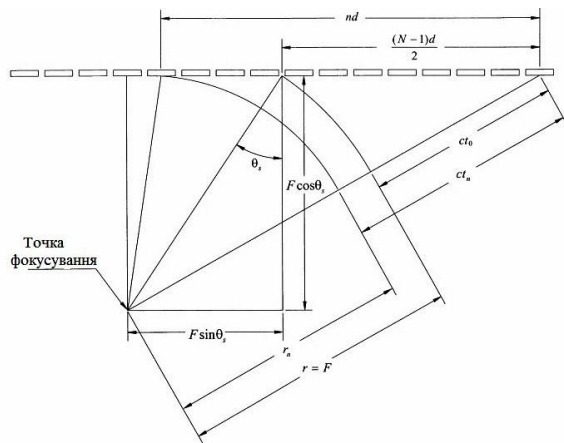


Рисунок 3 – Геометрія лінійної УЗ ФР, що використовується для розрахунку часових затримок

$$p(r, \theta, t) = \frac{P_o}{r} \frac{\sin\left(\frac{k a \sin \theta}{2}\right) \sin\left[\left(\frac{\omega \Delta \tau - k d \sin \theta}{2}\right) N\right]}{\frac{k a \sin \theta}{2} \sin\left(\frac{\omega \Delta \tau - k d \sin \theta}{2}\right)} \times \exp\left[-j\left(\frac{k a \sin \theta}{2}\right)\right] \exp\left[-j\left(\frac{\omega \Delta \tau - k d \sin \theta}{2}\right)(N-1)\right] \times \exp\left[-j(kr - \omega t)\right] \quad (1)$$

де $\Delta \tau$ – часова затримка між сусідніми елементами (для гомогенного ізотропного середовища), $\Delta \tau = d \sin \theta_s / c$, θ_s – потрібний кут, c – швидкість поширення звуку в заданому середовищі

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}\right) \sin\left[\frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} N\right]}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} N \sin\left[\frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda}\right]} \right| \quad (2)$$

Напрямок поширення акустичного пучка може бути переорієнтований на будь який кут лише шляхом зміни послідовності синхронізації імпульсів збудження (рис.3). Часові затримки для фокусування на необхідний кут θ_n можуть бути розраховані за наступною формулою:

$$t_n = \frac{F_n}{c} \left\{ \left[1 + \left(\frac{Nd}{F_n} \right)^2 + \frac{2Nd}{F_n} \sin \theta_n \right]^{1/2} - \left[1 + \left(\frac{(n-N)d}{F_n} \right)^2 - \frac{2(n-N)d}{F_n} \sin \theta_n \right]^{1/2} \right\},$$

де t_n – необхідна затримка для n -го елемента ($n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$), F_n – фокусна відстань, c – швидкість поширення звуку в заданому середовищі, N – кількість елементів ФР, d – відстань між елементами ФР.

З метою експериментальної оцінки технології УЗ ФР були проведені експериментальні дослідження з метою оцінки можливості отримання інформації щодо виду дефекту.

Ультразвуковий контроль здійснювався за допомогою дефектоскопу з ФР SIUI CTS 602, країна виробник – Китай. Основні технічні характеристики подані в табл. 1 [6]. Дефектоскоп марки CTS - 602 працює у двох режимах імпульсний ультразвуковий і режим УФР, використовуючи інтерфейс USB можна безпосередньо експортувати результати для полегшення зберігання даних. 32 фізичних канали підтримують 16, 32, 64 або 128 елементів ФР. Режими сканування включають в себе лінійне і секторне сканування, при лінійному скануванні усі елементи ФР генерують УЗ промені під одним і тим же кутом, щоб сканувати в електронному вигляді на одній осі, а при секторному скануванні промені приймають кут в заданому діапазоні сканування. Програмне забезпечення дефектоскопа істотно полегшує процес прийняття рішень щодо виявленого дефекту за рахунок наочної візуалізації процесу і відображення зміни параметрів в реальному часі, в тому числі в процесі сканування.

Для визначення роздільної здатності дефектоскопу в режимі УЗФР було виготовлено зразок з циліндричними відбивачами розміщеними на різній глибині (крок 2 мм) під кутом 45° та по радіусу 30 мм, (рис.4). Фокусні плями від відбивачів чітко відрізняються, визначивши їх координати можна визначити відстань між ними та розміри.

Таблиця 1 - Характеристики дефектоскопу SIUI CTS-602

Системний діапазон	1 – 10 МГц
Частота дискретизації	120 МГц
Активна апертура	2-32, верхня границя залежить від номера елемента перетворювача
Генератор імпульсів	Біполярний прямокутний імпульс. Напруга передавання: 20-150 В, крок – 10 В. Ширина імпульсу – 40-500 нс, шаг – 20 нс. Частота повторення 100 Гц-8кГц Затримка передачі: 0 - 20 мкс
Типи сканування	Лінійне/секторне/D-сканування
Діапазон кутів сканування	Лінійне сканування: -45° до +45° Секторне сканування: -80° до +80°
Вимірювання	Два строби: вимірюється амплітуда, пройдений шлях ультразвуку, вертикальний шлях, горизонтальний шлях, відстань між стробами. Два вимірювальних курсори: вимірюють горизонтальну і вертикальну позиції і відстань між курсорами на зображенні

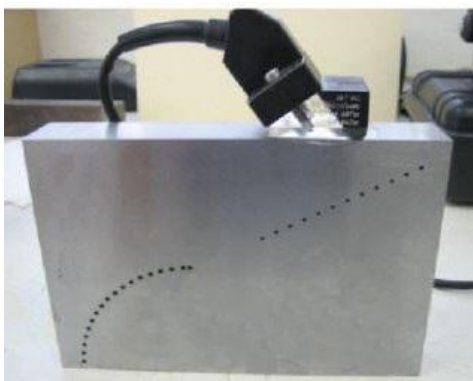


Рисунок 4 – Зразок для визначення роздільної здатності дефектоскопа

Авторами даної роботи проведені роботи по дослідженню фактичного технічного стану ділянок зварних з'єднань магістрального газопроводу (рис. 5) діаметром 530 мм і товщиною стінки 8 мм, що був введений в експлуатацію у 1966 році. Матеріал досліджуваних трубних вірців - низьколегована вуглецева конструкційна сталь 16ГС.

Дослідженням піддавались два зразки розмірами 400х200 мм зі зварними швами, що були вирізані з труб, які демонтувалися в ході виконання ремонтних заходів.

Дослідженням піддавались два зразки розмірами 400х200 мм зі зварними швами, що були вирізані з труб, які демонтувалися в ході виконання ремонтних заходів.

З поверхні ділянок контролю вірців було видалено пил, продукти корозії та інші забруднення. Поверхні із залишками

забруднення очищалися вручну за допомогою абразивних матеріалів та металевих щіток з незначними натискними зусиллями та миючими засобами.



а)



б)

Рисунок 5 – Експериментальні зразки для проведення контролю з УЗФР

У ході роботи були проведені ультразвукові дослідження зварних швів на предмет виявлення дефектів типу порушення суцільності.

Дефектоскопія зразка проводилась за допомогою 16-елементного перетворювача 5,0L16-0.5-9 з робочою частотою 5,0 МГц з похилою призмою (рис. 6). Підключення перетворювача і налаштування проводили згідно інструкції з експлуатації, що входить в комплект технічного засобу, на стандартних зразках для калібрування. В ролі контактної речовини використовувався солідол жировий Ж-2 згідно з ГОСТ 1033-79 для забезпечення хорошого акустичного контакту.

Перетворювач розміщувався перпендикулярно до осі шва на відстані 18 мм і плавно переміщувався паралельно осі шва.

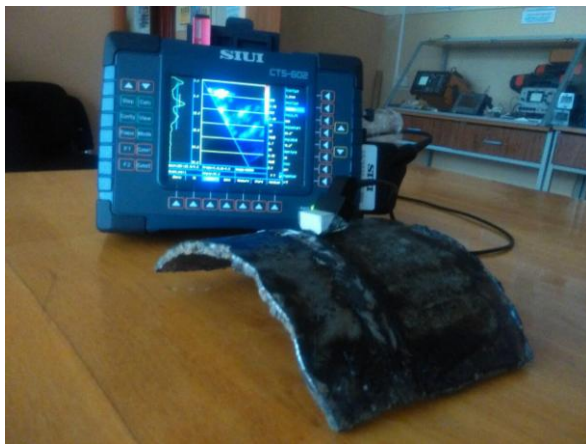


Рисунок 6 – Установка для контролю зварних з'єднань

В результаті контролю одержано акустичні зображення поперечного перерізу тестового зразку (S-скани). До уваги приймалися ті зображення, амплітуда від виявленого дефекту в яких була найбільшою.

Аналіз зображень, отриманих в реальних умовах контролю, дозволяє сформулювати ряд загальних ознак, що характеризують існування дефекту в виділеному (і візуалізованому) обсязі зварного шва:

- Зображення несущільності має спостерігатися не менше, ніж у двох сусідніх сканах - шарах.
- Часто спостерігаються «пропуски» в одному або декількох шарах. В цьому випадку необхідно переконатися, що відсутність зображення не пов'язане з відсутністю акустичного контакту.
- Зображення порушення цілісності - сфокусоване зображення, яке є результатом когерентної обробки даних.

Після одержання набору секторних сканів та експортування даних за допомогою USB –порту до ПК, проводилась обробка зображень за допомогою програмного пакету Image J. На акустичне зображення нанесено контур зварного з'єднання та координатну сітку. При наявності дефектів в контрольованому зразку на акустичному зображенні з'являється геометричної фігури червоного кольору – ознаки максимальної амплітуди. Характерними для плоского дефекту є:

- сукупність двох і більше незалежних «плям» червоного кольору розмішених на невеликій відстані одна від одної,
- зображення різної тригонометричної форми в сусідніх шарах,
- затінення зображення геометричних відбивачів або інших несущільностей, розташованих далі за ним в напрямку поширення акустичного пучка.

Об'ємний дефект:

- зазвичай не затінює зображення геометричних відбивачів та інших несущільностей, розташованих далі за ним в напрямку поширення акустичного променя;
- форма зображення порушення цілісності схожа до кола, при переміщенні перетворювача на сусідніх шарах витягується в овал;
- при зменшенні активної апертури зображення фокусної плями стає чіткішим.

В результаті опрацювання акустичних зображень виявлено такі дефекти: непровар в корені шва (рис.7) несплавлення (рис.8), шлакове включення (рис.7, в), що свідчить про адекватність використання розробленої методики для контролю металоконструкцій відповідального призначення.

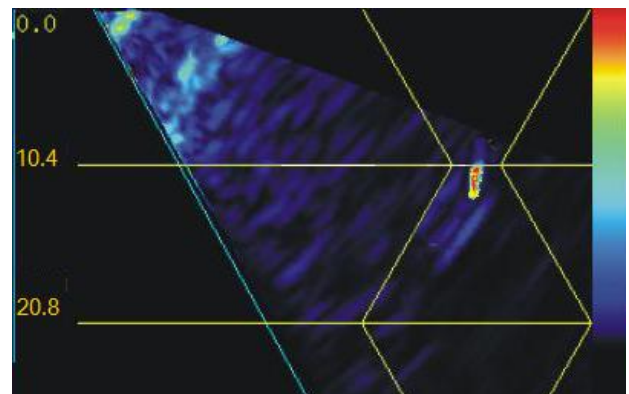


Рисунок 7 – Акустичне зображення непровару кореня шва

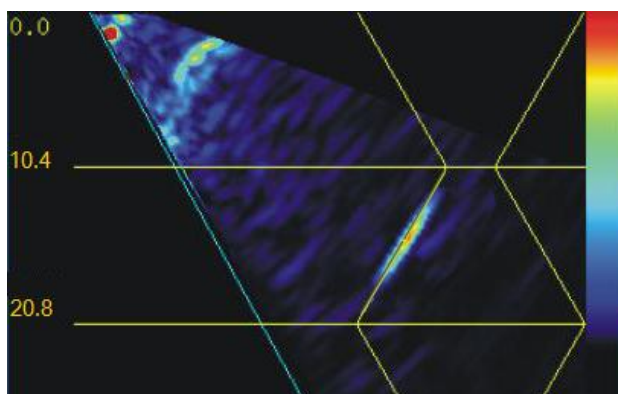


Рисунок 8 – Акустичне зображення несплавлення

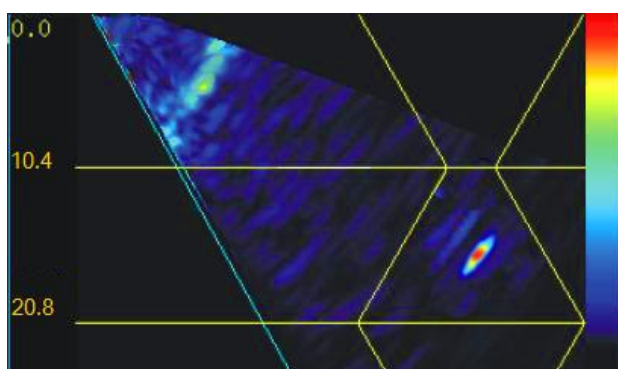


Рисунок 9 – Акустичне зображення газової пори

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши контроль за допомогою УЗ ФР, можна зробити висновок, що дана методика незамінна при експертному контролі, для швидкого пошуку порушень цілісності, а також для виявлення дефектів, несприятливо орієнтованих до зазначеного в нормативно-технічному документі кутку.

За допомогою УЗ ФР можна визначити характер дефекту, що дозволить більш якісно судити про його критичності. Для визначення реальних розмірів дефекту необхідно розробити спеціальне програмне забезпечення для обробки

зображень (очищення від шуму). Незважаючи на необхідність доопрацювання даної технології, вона є перспективним напрямком розв'язання оберненої задачі розсіювання ультразвукової енергії від дефекту, що дозволяє вивести дефектоскопію зварних з'єднань на новий рівень.

Література

1. Данилов В.Н., И.Н. Ермолов, С.В. Ушаков Исследование рассеяния поперечных волн на трещине // Дефектоскопия, 2001, №5. С. 42-49.
2. Щербинский В.Г., Белый В.Е. Новый информативный признак характера дефектов при ультразвуковом контроле // Дефектоскопия, 1975, № 3. - С. 27-37.
3. Деев Г.Ф. Дефекты сварных швов / Деев Г.Ф., Пацкевич И.Р. - Киев: Наук. думка, 198.-208 с.
4. Попович О.В., Карпаш М.О. "Аналіз акустичних методів ідентифікації та визначення параметрів дефектів металоконструкцій" // "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ" №2 (2014): 141-148.
5. Olympus N. D. T. "Introduction to phased array ultrasonic technology applications." D Tech Guideline", Olympus NDT (2004).
6. Інструкція з експлуатації ультразвукового дефектоскопу SIUI CTS-602. Режим доступу: <http://ultracon.com.ua/files/237/602.pdf>

Поступила в редакцію 18.06.2016 р.

Рекомендували до друку:
 докт. техн. наук, проф. Карпаш О.М.,
 докт. техн. наук, проф. Райтер П.М.